Vol.11, No.4, Winter 2023, pp.127-148 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2022.75445.1188 Open access

Land Subsidence Hazard Zoning in Hashtgerd Plain based on Integrated Multi-Criteria Decision-Making Approach: WOI-BWM

Shabnam Mehrnoor [a], Maryam Robati[b*], Mir Masoud Kheirkhah Zarkesh[c], Forough Farsad[b], Shahram Baikpour[b]

[a] PhD Candidate in Environmental Science, Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[b] Assistant Professor, Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[c] Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2 March 2022 ***Revised: 5 July 2022*** ***Accepted: 9 July 2022***

Abstract

The occurrence of land subsidence phenomenon and its potential hazards in the plains of Iran due to the water crisis and drought period has grown significantly in recent years. In this study, the zoning of land subsidence hazard in the Hashtgerd plain was discussed and 19 criteria were selected as factors that influence the subsidence. The mentioned layers were prepared in GIS, weighted based on the best-worst method (BWM) and integrated using the Weighted Overlay Index (WOI). The results of BWM method showed that groundwater abstraction (0.219), the type of geological formation (0.157), the decrease of groundwater level (0.079), and groundwater depth (0.078) are important factors on the potential of subsidence hazard in the study area. Moreover, in order to evaluate the results of this model, the ROC curve was used, which has an accuracy of 90%. The results showed that land subsidence hazard of 10.66% of the study area was in very low category, 38.51% in low category, 31.49% in medium category, 11.66% in high category and 7.69% is in the very high category. According to the results, there are areas with a high probability of subsidence in the central part of Hashtgerd Plain, which requires continuous evaluation, controling, and monitoring of the criteria that affect the situation.

Keywords: Land Subsidence, Aquifer Recharge, Hashtgerd Plain, Bwm Model

---

*. Corresponding author: Maryam Robati E-mail: m.robati@srbiau.ac.ir Tel: + 989125038338
How to cite this Article: Mehrnoor, Sh., Robati, M., Kheirkhah Zarkesh, MM. Farsad, F., & Baikpour, Sh. (2022). Land subsidence hazard zoning in Hashtgerd Plain based on an integrated multi-criteria decision-making approach: WOI-BWM. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *11*(4), 127-148.
DOI:10.22067/geoeh.2022.75445.1188

Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
Geography and Environmental Hazards
Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75445.1188

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۱۴۸-۱۲۷

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد بر اساس رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چند معیار: WOI-BWM

شبنم مهرنور - دانشجوی دکتری علوم محیطزیست، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
مریم رباطی[1]- استادیار، گروه علوم محیطزیست، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
میرمسعود خیرخواه زرکش - دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی.
فروغ فرساد - استادیار، گروه علوم محیطزیست، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
شهرام بیک‌پور - استادیار، گروه علوم محیطزیست، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۱/۴/۱۴ **تاریخ تصویب:** ۱۴۰۱/۴/۱۸

چکیده

وقوع پدیده فرونشست زمین و خطرات احتمالی آن در دشت‌های ایران به علت بروز بحران آب و خشکسالی، طی سالیان اخیر رشد چشمگیری داشته است. در این مطالعه به پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست در دشت هشتگرد پرداخته و نوزده معیار شامل میزان افت آب زیرزمینی، برداشت آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، ضخامت آبرفت، تغذیه آبخوان، تراکم چاه‌ها، تراکم زهکشی، عمق سطح آب زیرزمینی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق سنگ‌بستر، متوسط بارش سالانه، متوسط دمای سالانه، نوع اقلیم سرزمین، کاربری کشاورزی، کاربری شهری، کاربری صنعتی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و فاصله از گسل به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست منطقه انتخاب شدند. لایه‌های مذکور در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه، بر اساس مدل بهترین- بدترین (BWM) وزن دهی و با استفاده از شاخص هم‌پوشانی

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۵۰۳۸۳۳۸ Email: m.robati@srbiau.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

مهرنور، شبنم؛ رباطی، مریم؛ خیرخواه زرکش، میرمسعود؛ فرساد، فروغ؛ بیک پور؛ شهرام؛ ۱۴۰۱. پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد براساس رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چندمعیار: WOI-BWM. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۴). صص ۱۴۸-۱۲۷

https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75445.1188

وزین (WIO) ادغام شدند. نتایج روش BWM نشان داد عوامل برداشت از آب زیرزمینی (۰/۲۱۹)، نـوع سازند زمین‌شناسی (۰/۱۵۷)، افت سطح آب زیرزمینی (۰/۰۷۹) و عمـق آب زیرزمینـی (۰/۰۷۸) اهمیـت بیشتری بر پتانسیل خطر فرونشست در منطقه موردمطالعه دارند. همچنین به‌منظور ارزیابی نتایج ایـن مـدل از منحنی (ROC) استفاده شد که دارای دقتی معادل ۹۰ درصد است. نتایج نشـان داد کـه ۱۰/٦٦، ۳۸/۵۱، ۳۱/٤۹، ۱۱/٦٦ و ۷/٦۹ درصد از مساحت دشت هشتگرد به ترتیب به طبقه خطر خیلی کم، کـم، متوسـط، پرخطر و خیلی پرخطر اختصاص یافته است که بر این اساس مناطقی با احتمال فرونشست زیـاد در نیمـه مرکزی دشت هشتگرد قرار دارند که مستلزم ارزیابی، نظارت و پایش مستمر عوامل مؤثر در وقـوع پدیـده فرونشست توسط مدیران و برنامه‌ریزان شهری است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، تغذیه آبخوان، دشت هشتگرد، مدل BWM.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، یک خطر زمین‌شناسی که در بسیاری از شهرهای جهان گسترش یافته است، مسأله فرونشست زمین است (چن[1] و همکاران، ۲۰۱۹). فرونشست زمین، همان‌طور که توسط یونسـکو تعریـف شـده اسـت، شـامل نشست یا نشست تدریجی سطح زمین به سمت پایین است که ممکن است با جابه‌جایی‌های عمودی با بردار انـدک افقی نیز همراه باشد (یونسکو[2]، ۲۰۱۸). فرونشست زمین یکی از پیامدهای استفاده بی‌رویه و سوء مـدیریت از منـابع آبی است که به دلیل فشردگی خاک در اثر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد (پاچکو[3] و همکـاران، ۲۰۰٦) که باعث آسیب به محیط طبیعی و حتی خسارات اقتصادی می‌شود (هو[4] و همکاران، ۲۰۰۹). در فعالیت‌های انسانی، این پدیده متأثر از فعالیت‌هایی مانند برداشــت بیش‌ازحـد آب از سـفره‌های زیرزمینـی (وانـگ[5] و همکـاران، ۲۰۱۹؛ ندیری[6] و همکاران، ۲۰۱۸)؛ زهکشی خاک‌های آلی (توسی[7] و همکاران، ۲۰۱۳)؛ اسـتخراج سـوخت‌های فسـیلی و استخراج زیرسطحی همچون معدنکاری (گالُوِی[8]، ۲۰۱٦)؛ افزایش حفاری چاه‌های بهره‌برداری (ژانگ[9] و همکـاران، ۲۰۱۹) و پدیده‌های طبیعی زمین‌شناسی همچون حرکات تکتونیکی گسل‌ها (سوپاتا[10] و همکاران، ۲۰۲۰؛ پرادهـان[11]

1 Chen
2 UNESCO
3 Pacheco
4 Hu
5 Wang
6 Nadiri
7 Tosi
8 Galloway
9 Zhang
10 Sopata
11 Pradhan

و همکاران، ۲۰۱٤) و کارستی شدن به دلیل انحلال سنگ‌آهک (دزیر[1] و همکاران، ۲۰۱۸) است. فرونشست اگرچه پیامد فشردگی سطوح زیرین خاک است لیکن خود معرف حدوث و پیامد ناگوار زیست‌محیطی در افق آتی است. فشردگی سطوح زیرین و افت عمق ایستابی، کاهش حجم و فضای نگهداشت آب را به دنبال خواهد داشت. به بیان ساده‌تر کاهش مخزن آب زیرزمینی پیامد منطقی رخداد پدیده فرونشست است (شریفی‌کیا و همکاران، ۱۳۹٤) که می‌تواند خسارت‌های شدیدی به تأسیسات انسان‌ساخت (ساختمان)، باند فرودگاه‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، خیابان‌ها، خطوط حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای، کاهش حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی (با فشرده شدن و از بین رفتن تخلخل موجود در خاک)، اختلال در الگوی جریان‌ها و تداخل آب‌شور و شیرین و تخریب مستحدثات زیرسطحی (قنات‌ها، شبکه سوخت و آب‌رسانی، تونل‌های شهری و معادن) را به دنبال داشته باشد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۸). ازآنجایی‌که اولین گام در مطالعه این پدیده، شناخت گستره فضایی آن و اندازه‌گیری هر چه دقیق‌تر میزان فرونشست است؛ بنابراین با شناخت مشخصات مکانی و زمانی این پدیده، امکان ارائه و توسعه مدل منطقه‌ای این پدیده میسر شده (مهرابی و غضنفری‌پور، ۱۳۹۸) و از این طریق می‌توان زیرساخت مناسبی از منابع داده و اطلاعاتی را برای مدیران و دست‌اندرکاران در راستای تعدیل، کنترل و پیشگیری از فاجعه فراهم آورد (شریفی‌کیا و همکاران، ۱۳۹۲). مطالعات متعددی برای ارزیابی فرونشست با استفاده از سه رویکرد: الف) مدل‌های ریاضی با استفاده از مدل‌های جریان آب زیرزمینی و مدل‌های فرونشست برای بررسی اثرات کاهش سطح آب منجر به فرونشست؛ ب) تکنیک‌های سنجش‌ازدور برای نظارت بر فرونشست زمین با قابلیت بررسی روابط احتمالی با رویکرد هیدروژئولوژیکی؛ ج) استفاده از تکنیک‌های GIS برای نقشه‌برداری مناطق آسیب‌پذیر در برابر فرونشست انجام شده است (صادق فام[2] و همکاران، ۲۰۲۰). در جدول (۱) سابقه‌ای از آن ارائه شده است.

جدول ۱- مرور منابعی از مطالعات مرتبط با پدیده فرونشست

طبقه	نویسندگان	داده‌های مورداستفاده	موقعیت	نتایج کلیدی
مدل‌های آماری و تجربی	مُدُنی[3] و همکاران (۲۰۱۳)	تغییر شکل زمین، خصوصیات خاک زیرین و رژیم آب‌های زیرزمینی	بلوگنا (ایتالیا)	همبستگی بین فرونشست زمین، برداشت آب زیرزمینی و خاک‌های زیرین شناسایی شد.
	فانت[4] و همکاران (۲۰۱٦)	جریان آب‌های سطحی، نقشه‌های کاربری زمین و داده‌های آب‌وهوا	کالیفرنیا (آمریکا)	ارزیابی استراتژی‌های مدیریتی برای کاهش اثرات نامطلوب فرونشست صورت گرفت.

1 Desir
2 Sadeghfam
3 Modoni
4 Faunt

طبقه	نویسندگان	داده‌های مورداستفاده	موقعیت	نتایج کلیدی
	شرستها[1] و همکاران (۲۰۱۷)	خصوصیات فیزیکی، اقلیم، تغذیه آب‌های زیرزمینی، تراکم‌پذیری و نوسان سطح آب‌های زیرزمینی	دره کاتماندو (نپال)	پهنه‌بندی خطر فرونشست، مکان و سطوح بالقوه خطر را برای مدیریت پیشگیری از خطر برجسته می‌کند.
مدل‌هایی بر پایه InSAR	آبیدین[2] و همکاران (۲۰۱۵)	تصاویر راداری InSAR و GPS	جاکارتا (اندونزی)	میزان فرونشست دارای تغییرات فضایی و زمانی است که ناشی از استفاده بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی، بار سازه‌ها و فعالیت‌های زمین‌شناسی در منطقه است.
	ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)	تصاویر سنتینل ۱	پاکدشت (ایران)	منطقه به دلیل نداشتن موانع ژئومورفولوژی، در طی سال‌های اخیر با روند توسعه ساخت‌وسازها، توسعه فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی مواجه شده و همین امر سبب افزایش بهره‌برداری و پدیده فرونشست شده است.
	پرادهان[3] و همکاران (۲۰۱٤)	ارتفاع، شیب، جهت، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، NDVI، خاک، قدرت جریان رودخانه، رطوبت، توپوگرافی	دره کیتا (مالزی)	نتایج نشان داد که مدل FR در پیش‌بینی نسبت به مدل تابع باور شواهد دقت کمتری دارد.
	رحمتی[4] و همکاران (۲۰۱۹)	فاصله از قنات، کاربری اراضی، فاصله از زمین‌های جنگلی، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل‌ها، سطح آب زیرزمینی	کاشمر (ایران)	آن‌ها بیان کردند برداشت آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن سنگ‌شناسی و فاصله از رودخانه‌ها مهم‌ترین عوامل در فرونشست هستند.

در حال حاضر، این پدیده به همراه پیامدهای زیست‌محیطی آن در اکثر دشت‌های دنیا به چشم می‌خورد (رهنما و میراثی[5]، ۲۰۱٦). در ایران نیز فرونشست سابقه طولانی دارد. در واقع با توجه به وضعیت نیمه‌خشک بسیاری از مناطق ایران و نیاز به منابع آبی، میزان بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی بسیار بیشتر از میزان تغذیه آن‌ها است، به همین دلیل تحت تأثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی، بسیاری از دشت‌های ایران با فرونشست مواجه هستند (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۹). در این میان، یکی از مناطقی که با مخاطره فرونشست مواجه است، دشت هشتگرد در غرب استان تهران است که با توجه به اهمیت موضوع در این تحقیق به ارزیابی میزان فرونشست آن پرداخته شده است. بررسی‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (۱۳۸٦) با استفاده از روش تداخل سنجی ماهواره‌ای

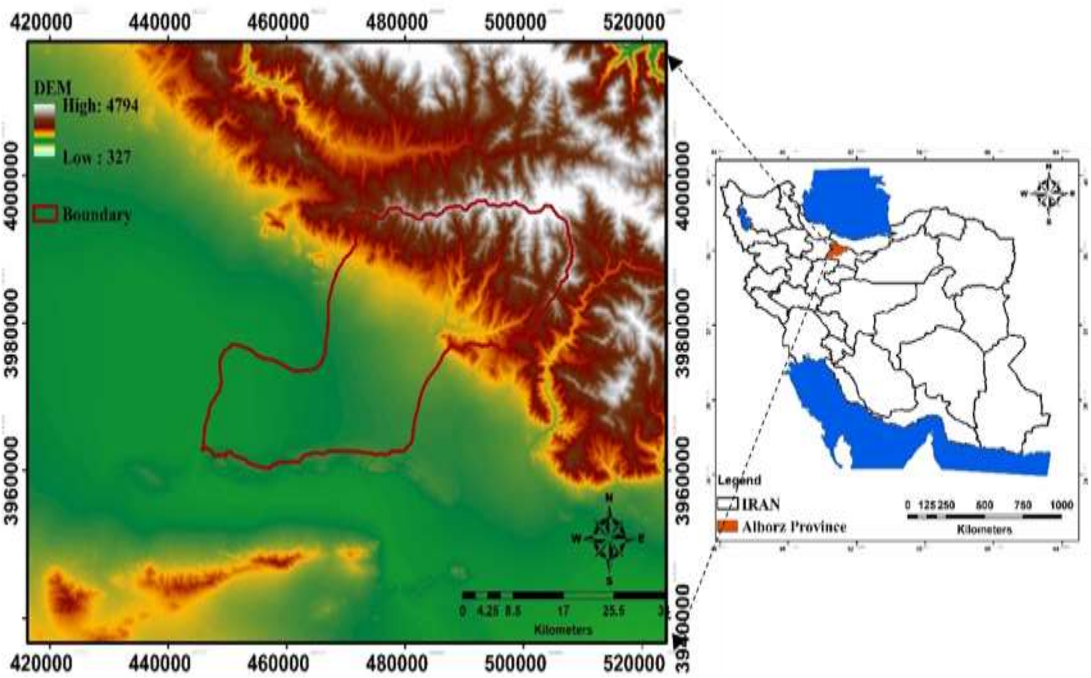
1 Shrestha
2 Abidin
3 Pradhan
4 Rahmati
5 Rahnema & Mirassi

امواج رادار نشان داده است که در پهنه‌ای گسترده از این دشت، فرونشست زمین با نرخ بیشینه ۱٦ و نرخ میانگین ۸/٤ سانتی‌متر بر سال شکل گرفته است. این دشت در سال‌های اخیر به‌طورجدی با بحران خشکسالی و کاهش سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است. همچنین گمان می‌رود که در آینده نیز با توجه به تغییرات اقلیمی و با فرض ادامه یافتن شرایط موجود در برداشت از منابع آب زیرزمینی، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و بالطبع آن پدیده فرونشست با شدت و گستردگی بیشتری ادامه یابد. لذا تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست برای حفاظت از منابع انسانی و طبیعی و کاهش خسارات ناشی از وقوع آن می‌تواند کمک شایانی به مردم محلّی و مراکز ذی‌صلاح نماید. در این راستا، هدف از پژوهش حاضر شناسایی و طبقه‌بندی نواحی حساس بر اساس مدل شاخص همپوشانی وزین، تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرونشست با استفاده از روش وزن‌دهی BWM و ارزیابی صحت این مدل در دشت هشتگرد است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه موردمطالعه

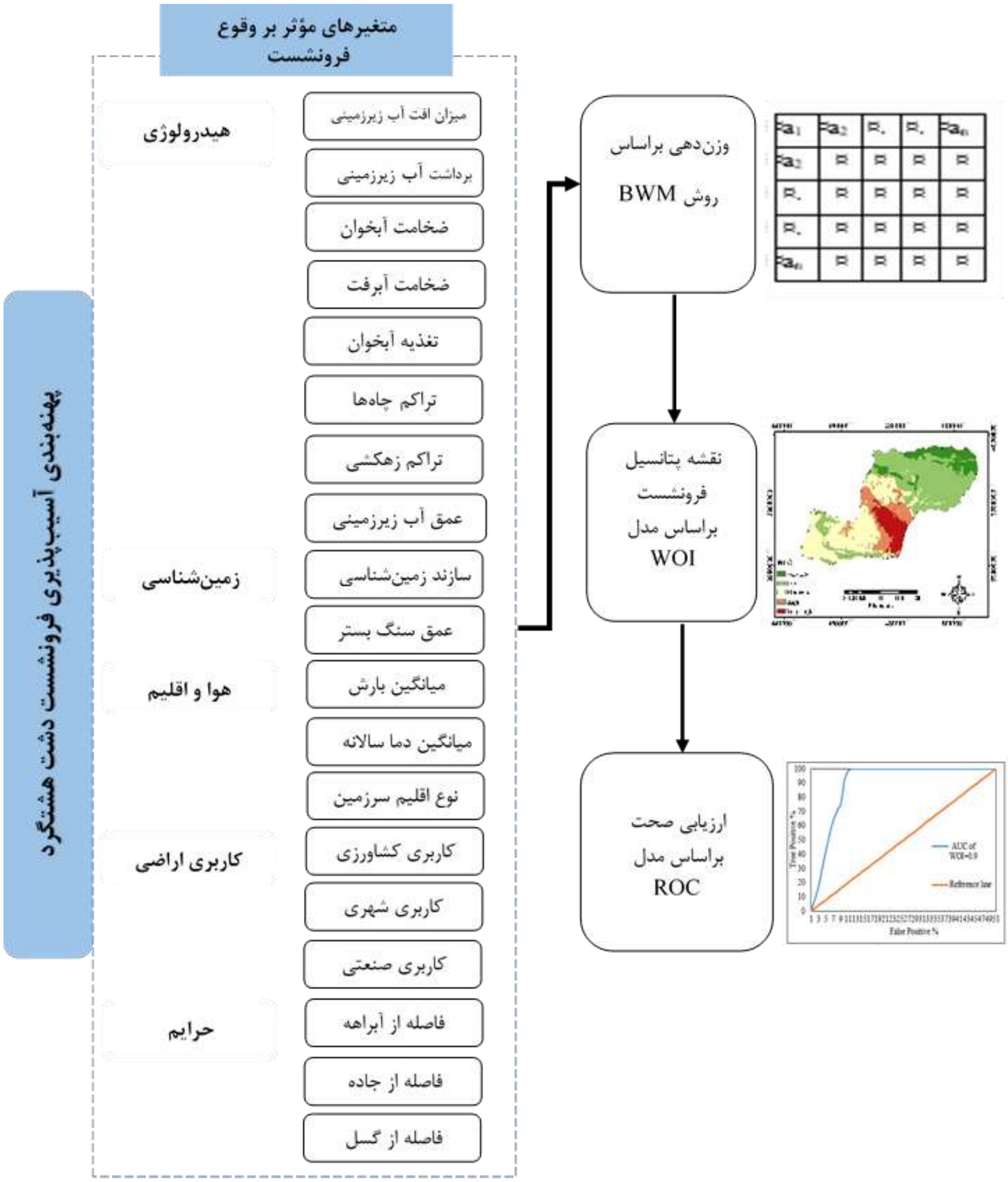
دشت هشتگرد از دیدگاه تقسیمات کشوری در استان البرز قرار دارد. مساحت این حوضه در حدود ۱۱٦۸/۸ کیلومترمربع است که در عرض جغرافیایی ″۴۵ ′۴۷ °۳۵ تا ″۰۵ ′۰۳ °۳٦ شمالی و طول جغرافیایی ″۰۵ ′۲۹ °۵۰ تا ″۲۸ ′۵٤ °۵۰ شرقی قرار دارد. آب‌وهوای منطقه در بخش‌های شمالی، نیمه مرطوب است و به‌تدریج به‌سوی جنوب دشت با کاهش ارتفاع به نیمه‌خشک تبدیل می‌شود (شکل ۱). بررسی‌های زمین‌شناسی منطقه برای شناخت پدیده فرونشست ضروری است. به‌طورکلی از دیدگاه هدایت هیدرولیکی، سازندهای زمین‌شناسی این محدوده به ٤ گروه اصلی تقسیم می‌شوند: الف) سازندهایی با نفوذپذیری بسیار کم؛ ب) سازندهایی با نفوذپذیری کم؛ پ) سازندهایی با نفوذپذیری متوسط و ت) سازندهایی با نفوذپذیری زیاد تا خیلی زیاد. همچنین ساختار زمین‌ساختی ناحیه موردمطالعه از فعالیت‌های زمین‌ساختی البرز تأثیر پذیرفته است. به همین دلیل، بیشتر چین‌خوردگی‌ها و گسل‌ها، روند خاوری- باختری دارند. از گسل‌های مهم این منطقه می‌توان گسل آبیک، گسل جنوب طالقان و گسل ولیان را نام برد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، ۱۳۸٦).



شکل ۱- منطقه موردمطالعه

۲-۲- روش انجام پژوهش

پژوهش حاضر در پنج مرحله کلی به انجام رسیده است که شامل: ۱) شناسایی متغیرهای محیطی تأثیرگذار، ۲) آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی مربوط به متغیرهای محیطی مؤثر بر وقوع فرونشست زمین، ۳) بررسی اهمیت متغیرهای محیطی بر اساس روش بهترین- بدترین (BWM)، ٤) اجرای مدل شاخص همپوشانی وزین و تهیه نقشه پهنه‌بندی فرونشست زمین و ۵) اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) است. مراحل کلی این پژوهش در شکل نمایش داده شده است (شکل۲).



شکل ۲- مراحل انجام فرآیند پهنه‌بندی فرونشست در دشت هشتگرد

۲-۲-۱- تعیین معیارهای مؤثر بر فرونشست

در این پژوهش، با توجه به شرایط دشت هشتگرد، مرور منابع و همچنین نظر افراد خبره، معیارهای تأثیرگذار در پهنه‌بندی فرونشست زمین در ۲ بعد فیزیکی- شیمیایی و اقتصادی- اجتماعی، ۵ گروه معیارهای هیدرولوژی، زمین‌شناسی، هوا و اقلیم، کاربری اراضی و حرایم و ۱۹ زیرمعیار شامل میزان افت آب زیرزمینی، برداشت آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، ضخامت آبرفت، تغذیه آبخوان، تراکم چاه‌ها، تراکم زهکشی، عمق سطح آب زیرزمینی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق سنگ‌بستر، میزان بارش سالانه، متوسط دمای سالانه، نوع اقلیم سرزمین، کاربری کشاورزی، کاربری شهری، کاربری صنعتی، فاصله از آبراهه‌ها، فاصله از جاده‌ها و فاصله از گسل‌ها تدوین شدند. عابدینی و همکاران (۱٤۰۱) در پژوهشی بیان کردند که افت سطح آب، فاصله از رودخانه و لیتولوژی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرونشست زمین در دشت اردبیل است. محمدی[1] و همکاران (۲۰۱۹) برداشت از آب‌های زیرزمینی، ساختار زمین‌شناسی، فاصله از گسل و درصد شیب را از عوامل مؤثر در فرونشست بیان کردند.

۲-۲-۲- آماده‌سازی معیارها

با تعیین مجموعه‌ای از معیارها، نیاز است که هر معیار به‌صورت یک لایه نقشه در پایگاه داده‌های مبتنی بر GIS نشان داده شوند. در ذیل به تشریح معیارها خواهیم پرداخت:

- فاصله از آبراهه‌ها: آبراهه‌ها با افزایش فشار آب منفذی یکی از عوامل مهم در القاء ناپایداری در منطقه است (رنجگر[2] و همکاران، ۲۰۲۱؛ قربان‌زاده[3] و همکاران، ۲۰۲۰). لذا نقشه آبراهه‌ها از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه موردمطالعه استخراج گردید و سپس با استفاده از ابزار Distance در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه فاصله از آبراهه تهیه گردید که مقادیر پیوسته آن بین صفر تا ٤۸۲٦ متر است.

فاصله از گسل: گسل‌ها نقش بسیار مهمی در شکستگی و خوردشدگی واحدهای زمین‌شناسی و حرکت‌های توده‌ای دارند (نگهبان و همکاران، ۱٤۰۰). لرزش ناشی از ایجاد گسل می‌تواند باعث تشکیل یک تراکم غیر الاستیک به دلیل افزایش تنش مؤثر در خاک و ایجاد فرونشست شود (گالووی[4] و همکاران، ۱۹۹۹؛ ناوارو هرنانذز[5] و همکاران، ۲۰۲۰). در این پژوهش، گسل‌های منطقه از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استخراج گردید و سپس با استفاده از ابزار Distance در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه فاصله از گسل تهیه گردید.

میزان برداشت آب و افت سطح آب‌های زیرزمینی: یکی از دلایل فرونشست زمین مربوط به عکس‌العمل طبیعی آن در مقابل بهره‌برداری بیش‌ازاندازه و بالطبع آن افت سطح آب‌های زیرزمینی به دلیل کاهش فشار هیدرولیکی و

1 Mohammadi
2 Ranjgar
3 Ghorbanzadeh
4 Galloway
5 Navarro-Hernández

افزایش تنش بر رسوبات است (هانگ[1] و همکاران، ۲۰۱۲؛ هو[2] و همکاران، ۲۰۰۹). در این پژوهش، بـه‌منظور تهیـه نقشه میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی از اطلاعات تغییرات دوره ۱۵ ساله عمـق آب از شـرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) استفاده شده است و سپس با استفاده از روش درون‌یابی IDW نقشه پیوسـته میـزان افت سطح آب زیرزمینی تهیه شد. همچنین، میزان برداشـت آب زیرزمینـی بـا اسـتفاده از داده‌هـای تخلیـه چاه‌هـای بهره‌برداری تهیه گردید و سپس با استفاده از روش درون‌یابی IDW نقشه پیوسته برداشت آب زیرزمینی تهیه شد. در نقشه پیوسته مقادیر آن بین ۷ تا ۱۷۵۶ مترمکعب است.

تغذیه: تغذیه یکی از عوامل هیدرولوژیکی مؤثر در فرونشست اسـت. هرچـه میـزان تغذیـه بیشـتر باشـد، فشـار هیدرولیکی بیشتر شده و فاصله بین دانه‌ها افزایش می‌یابد که در نتیجـه تـنش مـؤثر کـاهش یافتـه و احتمـال وقـوع فرونشست کمتر می‌شود (صادق‌فام[3] و همکاران، ۲۰۲۰؛ ندیری[4] و همکاران، ۲۰۱۸). در این پژوهش، جهت تهیه لایه تغذیه از روش پیسکوپو (پیسکوپو[5]، ۲۰۰۱) استفاده شد. در روش پیسکوپو، لایه شیب زمین، بارندگی و نفوذپـذیری سطحی خاک (عمق ۰/۵ تا ۲ متری خاک سطحی) به لایه رستری تبدیل و با وزن‌دهی و رویهم‌گذاری لایـه‌ها، نقشـه پیوسته تغذیه تهیه شد که مقادیر آن بین ۰/۳۹ تا یک است.

ضخامت آبرفت: این ضخامت شامل فاصله بین سطح زمین تا سنگ کف است. در حالت کلی مشـاهده می‌شـود که نشست بیشتر در لایه‌هایی اتفاق می‌افتد که ضخامت آبرفت بیشتر باشد زیرا اگر ضخامت آبرفت منطقه بیشتر شود آب زیادی می‌توان استخراج کرد. برای تهیه این لایه از داده‌های ژئوفیزیک سطحی و چاه‌پیمـایی کـه از شـرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) اخذ شده بود، میزان ضخامت آبرفت در هر چاه منطقه محاسبه گردید و سپس این نقاط بر اساس روش IDW درون‌یابی شد و به فایل رستری تبدیل گردید و بدین ترتیب لایـه پیوسـته ضـخامت آبخـوان به‌دست آمد که مقادیر آن بین ۶۰ تا ۳۲۹ متر است.

پارامترهای اقلیمی: پارامترهای اقلیمی به‌خصوص دما و بارش به دلیل تأثیری که بر آب‌های زیرزمینی دارد؛ یکـی از عوامل مؤثر در پدیده فرونشست اسـت (ژِنـگ[6] و همکـاران، ۲۰۱۷؛ تفرشـی[7] و همکـاران، ۲۰۱۹). لـذا در ایـن پژوهش، داده‌های جدولی همانند موقعیت و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی مربوط به میـانگین بارنـدگی سـالیانه و میانگین دمای سالیانه منطقه موردمطالعه به‌صورت نقطه به محیط نرم‌افزار ArcGIS وارد گردیده و سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی IDW به نقشه هم‌باران سالیانه و هم‌دمای سالیانه تبدیل گردید. مقادیر نقشه هم‌باران بین ۱۹۹ تـا

1 Huang
2 Hu
3 Sadeghfam
4 Nadiri
5 Piscopo
6 Zheng
7 Tafreshi

۸۵۰ میلی‌متر در سال و مقادیر هم‌دما بین صفر تا ۱٤ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، فرونشست معمولاً در اقلیم‌های خشک که هم برداشت از آب زیرزمینی بیشتر است و هم تغذیه سفره آب زیرزمینی ضعیف‌تر است اتفاق می‌افتد. نقشه نوع اقلیم در منطقه موردمطالعه از سازمان هواشناسی استان البرز دریافت گردید که بر اساس آن اقلیم منطقه دارای ٦ کلاس است که کلاس اول معرف خشک‌ترین و کلاس ششم معرف مرطوب‌ترین کلاس اقلیمی است.

سازندهای زمین‌شناسی: سنگ‌ها به‌واسطه تفاوت در جنس رسوبات تشکیل‌دهنده و شرایط و دوران شکل‌گیری، مقاومت‌های مختلفی را در مقابل نیروهای خارجی از خود نشان می‌دهند (کانفورتی[1] و همکاران، ۲۰۱٤؛ مختاری و عابدیان[2]، ۲۰۱۹). به همین منظور، نقشه رقومی سنگ‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی (۱۳۹۹) دریافت گردید و خصوصیات واحدهای سنگ‌شناسی استخراج گردید (جدول ۲). منطقه هشتگرد دارای ۱۹ کلاس سازند زمین‌شناسی است که سازندها بر اساس جنس مواد تشکیل‌دهنده رتبه‌بندی شدند.

جدول ۲- واحدهای سنگ‌شناسی منطقه موردمطالعه

ردیف	واحد	سنگ‌شناسی	ردیف	واحد	سنگ‌شناسی
۱	Qft_2	مخروط‌افکنه‌ها و تراس‌های آبرفتی کم ارتفاع جدید	۱۱	Mm,s,l	مارن، ماسه‌سنگ آهکی، سنگ‌آهک، کنگلومرا
۲	TRJs	ماسه‌سنگ و شیل	۱۲	Ek	توف و شیل توفی
۳	Qft_1	مخروط افکنه‌ها و تراس‌های آبرفتی مرتفع قدیمی	۱۳	Eksh	شیل آهکی، شیل سیلتی با میان لایه توف شیشه‌ای
٤	Qcf	کفه رسی	۱٤	PeEz	سنگ‌آهک ریفی و مارن ژیپسی
۵	Mur	مارن، مارن گچ‌دار، ماسه‌سنگ و کنگلومرا	۱۵	Ktzl	سنگ‌آهک اوربیتولین‌دار
٦	Murmg	لایه‌های مارن گچ دار	۱٦	Pr	سنگ‌آهک
۷	Ebv	سنگ‌های بازالتی	۱۷	Ekgy	ژیپس
۸	pC-Cs	دولومیت و سنگ‌آهک ضخیم لایه با میان لایه‌های شیل	۱۸	COm	آهک تریلوبیت‌دار، دولومیت، ماسه‌سنگ و شیل
۹	Ek.a	شیل آهکی با میان لایه‌های توف	۱۹	pCk	شیل اسلیتی و ماسه‌سنگ کوارتزیتی
۱۰	Eat	توف آندزیتی			

کاربری اراضی: استفاده از زمین برای هدف‌های مختلف صورت می‌گیرد و تأثیر هر یک از این عوامل بر روی فرونشست می‌تواند متنوع باشد. کاربری‌های کشاورزی و شهری یکی از عوامل اصلی در افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی و بروز فرونشست است. همچنین وزن ناشی از این سازه‌های صنعتی سبب تراکم لایه‌های خاک و نشست

1 Conforti
2 Mokhtari & Abedian

سطح زمین می‌شود (ژو[1] و همکاران، ۲۰۲۰؛ ندیری و همکاران، ۱۳۹۷). لذا نقشه کاربری اراضی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری ایران گرفته شد. همچنین کاربری کشاورزی، مناطق مسکونی و مناطق صنعتی از آن استخراج گردید.

عمق سنگ‌بستر: در منطقه‌ای که سنگ‌بستر در عمق کمی قرار دارد، به دلیل ضخامت کم آبرفت، حفر چاه امکان‌پذیر نیست. بر این اساس، آب‌های زیرزمینی به مناطقی منتقل می‌شوند که ضخامت بیشتری دارند که منجر به افزایش فرونشست و جابه‌جایی افقی لایه‌ها در آن منطقه می‌شود (پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، ۱۳۹۲). در این پژوهش، لایه عمق سنگ‌بستر از نقشه جهانی عمق سنگ‌بستر (https://data.isric.org/geonetwork/srv/api/records/f36117ea-9be5-4afd-bb7d-7a3e77bf392a) تهیه گردید. مقادیر آن پیوسته و بین صفر تا ۲۳۱ متر است.

فاصله از جاده: محورهای ارتباطی با وجود عبور و مرورهای زیاد با ایجاد امواجی به طرفین و عمق زمین، به فروپاشی ذرات خاک در محل‌هایی که رطوبت کاهش پیدا کرده است ایجاد فرونشست زمین و فروچاله‌ها را تقویت می‌کند (عرب عامری[2] و همکاران، ۲۰۲۱؛ حکیم[3] و همکاران، ۲۰۲۰). نقشه جاده‌ها از نقشه توپوگرافی رقومی شده ۱:۵۰۰۰۰ منطقه موردمطالعه استخراج و سپس با استفاده از ابزار Distance در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه فاصله از جاده‌ها تهیه گردید.

تراکم چاه‌ها: میزان تراکم چاه‌ها و قنات‌ها با برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و میزان فرونشست ارتباط مستقیم دارد (جینه[4] و همکاران، ۲۰۱۹). در این پژوهش، موقعیت مکانی چاه‌ها به‌صورت x و y از شرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) دریافت گردید و پس از ورود به نرم‌افزار ArcGIS، میزان تراکم چاه‌ها بر اساس تعداد حلقه چاه در کیلومترمربع محاسبه گردید که مقادیر آن بین صفر تا ۲۲۳ حلقه چاه در کیلومترمربع است.

تراکم زهکشی: میزان تراکم زهکشی با میزان فرونشست ارتباط مستقیم دارد (حکیم و همکاران، ۲۰۲۰). تراکم زهکشی یا به عبارتی نسبت طول آبراهه‌ها به مساحت حوضه با استفاده از نقشه رقومی، ارتفاع و اکستنشن Archydro در نرم‌افزار ArcGIS محاسبه گردید که مقادیر آن بین ۰/۰۴ تا ۲/۱۴ کیلومتر در کیلومترمربع است.

ضخامت آبخوان: ازآنجایی‌که ضخامت آبرفت فاصله بین سطح زمین تا سنگ کف است و ضخامت آبخوان فاصله بین سطح ایستابی تا سنگ کف، لذا با کم کردن عمق سطح ایستابی از ضخامت آبرفت، ضخامت آبخوان را می‌توان برآورد نمود. به عبارتی، بخشی از ضخامت آبرفت را که اشباع از آب هست، می‌توان ضخامت آبخوان در

1 Zhou
2 Arabameri
3 Hakim
4 Jeanne

نظر گرفت. در این پژوهش، به دلیل موجود بودن نقشه نسبتاً دقیق ضخامت آبرفت و عمق سطح ایستابی، ایـن روش مورداستفاده قرار گرفت. در نقشه پیوسته ضخامت آبخوان، مقادیر بین صفر تا ۲۸۵ متر است.

عمق سطح آب زیرزمینی: میان عمق سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست ارتباط مسـتقیم وجـود دارد. نقشـه نقاط هم‌عمق پیزومترها از شرکت آب منطقه‌ای استان البرز (۱۳۹۹) دریافت گردید و با استفاده از روش IDW، نقشه پیوسته عمق سطح آب زیرزمینی تهیه شد که مقادیر آن بین ۱۰ تا ۱۴۵ متر است.

۲-۲-۳- وزن‌دهی معیارها بر اساس روش BWM

روش بهترین- بدترین نخستین بار در سال ۲۰۱۵ توسط رضایی ارائه گردید. این روش برمبنای مقایسات زوجی و بهره‌گیری از مدل برنامه‌ریزی خطی استوار شده است. در این روش بهتـرین و بـدترین شـاخص توسـط تصـمیم گیرنده مشخص می‌شود و مقایسه زوجی بین هر یک از این دو شـاخص (بهتـرین و بـدترین) و دیگـر شـاخص‌ها صورت می‌گیرد. همچنین در این روش، یک فرمول برای محاسبه نرخ ناسازگاری جهت بررسی اعتبار مقایسـه‌ها در نظر گرفته شده است. مراحل این روش به شرح ذیل است (رضایی[1]، ۲۰۱۶):

گام ۱: مجموعه زیرمعیارهای تصمیم‌گیری تعیین می‌شود.

گام ۲: بهترین و بدترین زیرمعیار با اعداد ۱ تا ۹ مشخص می‌شود.

گام ۳: ارجحیت بهترین معیار نسبت به دیگر معیارها به‌صورت $A_B = (a_{B1}.a_{B2} \dots .a_{Bn})$ مشخص می‌شود.

گام ٤: ارجحیت بدترین معیارها نسبت به دیگر معیارها بـه‌صـورت $A_W = (a_{W1}.a_{W2} \dots .a_{Wn})^T$ مشـخص می‌شود.

گام ۵: تشکیل بردار وزن بهینه به‌طوری که:

$$minmax_j \left\{ \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| . \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \right\} \quad (۱)$$
$$\sum_j^{s \cdot t \cdot} W_j = 1;$$
$$W_j \geq 0. \text{for all } j$$

همچنین، مسئله را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\min \xi$$
$$s \cdot t \cdot$$
$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi. \text{for all } j \quad (۲)$$
$$\left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \leq \xi. \text{for all } j \sum_j^{W_W} W_j = 1\,; \; W_j \geq 0. \text{for all } j$$

1 Rezaei

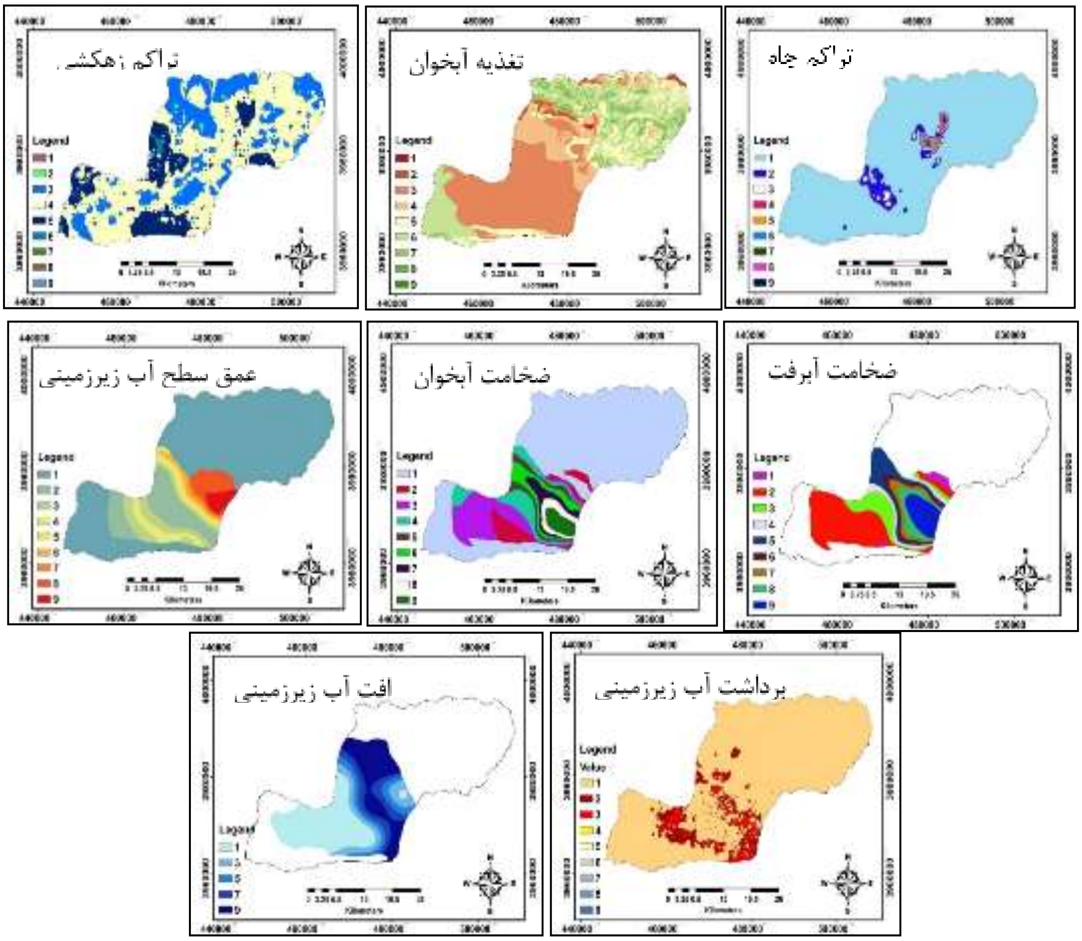
۲-۲-٤- اعتبارسنجی مدل

به‌منظور اعتبارسنجی از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) و مساحت سطح زیر این منحنی (AUC) استفاده شد. محور عمودی منحنی نشان‌دهنده درصد Sensitivity یا حساسیت است و محور افقی آن نشان‌دهنده Specificity یا ویژگی. مقدار AUC نشان‌دهنده احتمال این موضوع است که یک پیکسل انتخاب شده به‌طور تصادفی دارای پیش‌بینی صحیح باشد. بر این اساس، هر چه سطح زیرمنحنی به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده است (پرادهان[1] و همکاران، ۲۰۱٤).

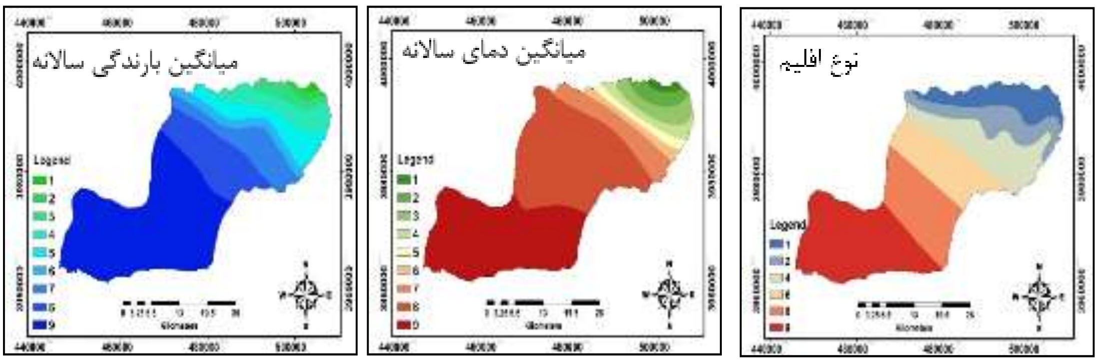
۳- بحث و نتایج

در این پژوهش، ۲ بعد فیزیکی- شیمیایی و اجتماعی- اقتصادی مشتمل بر ۵ معیار و ۱۹ زیرمعیار برای تعیین پهنه‌های مستعد فرونشست تدوین گردید و در ادامه بر اساس روش Z-Score استاندارد شدند. شکل‌های (۳) تا (۷) نقشه‌های هر یک از معیارها را در تعیین پهنه‌های مستعد فرونشست نشان می‌دهد.

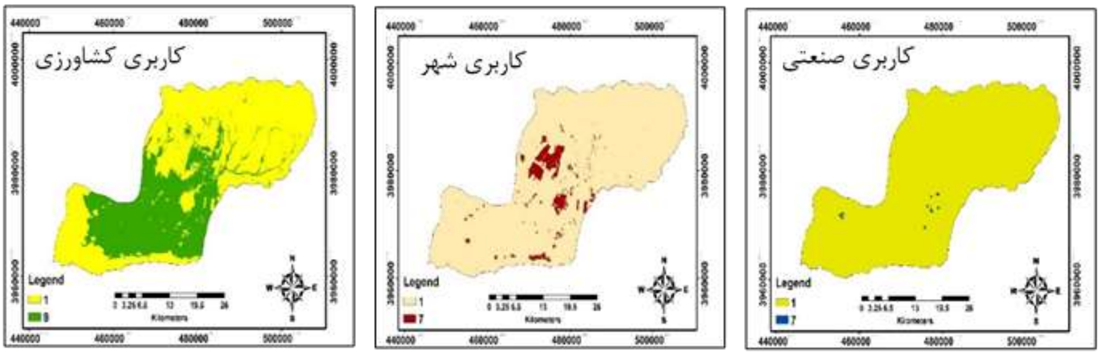
1 Pradhan



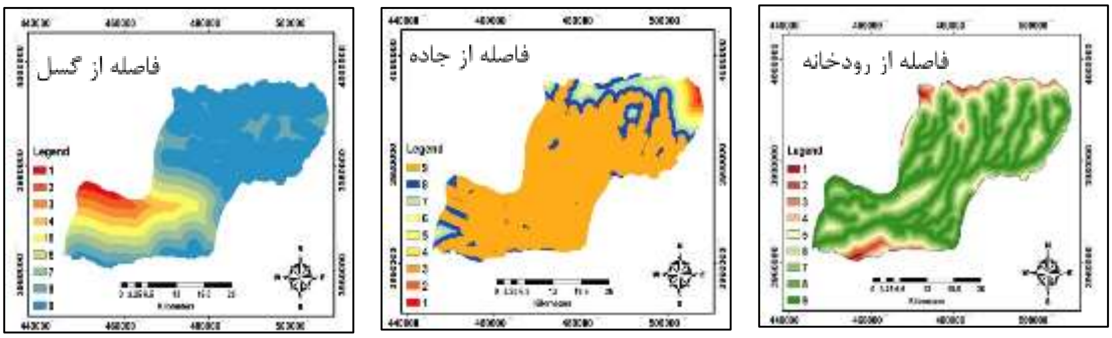
شکل ۳- طبقه‌بندی معیارهای هیدرولوژی در پهنه‌بندی فرونشست



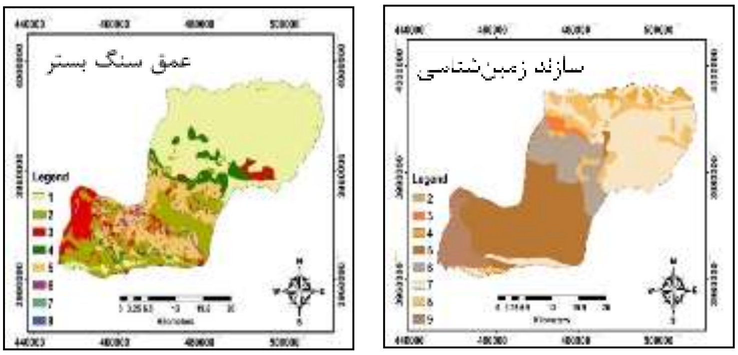
شکل ٤- طبقه‌بندی معیارهای هوا و اقلیم در پهنه‌بندی فرونشست



شکل ۵- طبقه‌بندی معیارهای کاربری اراضی در پهنه‌بندی فرونشست



شکل ٦- طبقه‌بندی معیارهای حرایم در پهنه‌بندی فرونشست



شکل ۷- طبقه‌بندی معیارهای زمین‌شناسی در پهنه‌بندی فرونشست

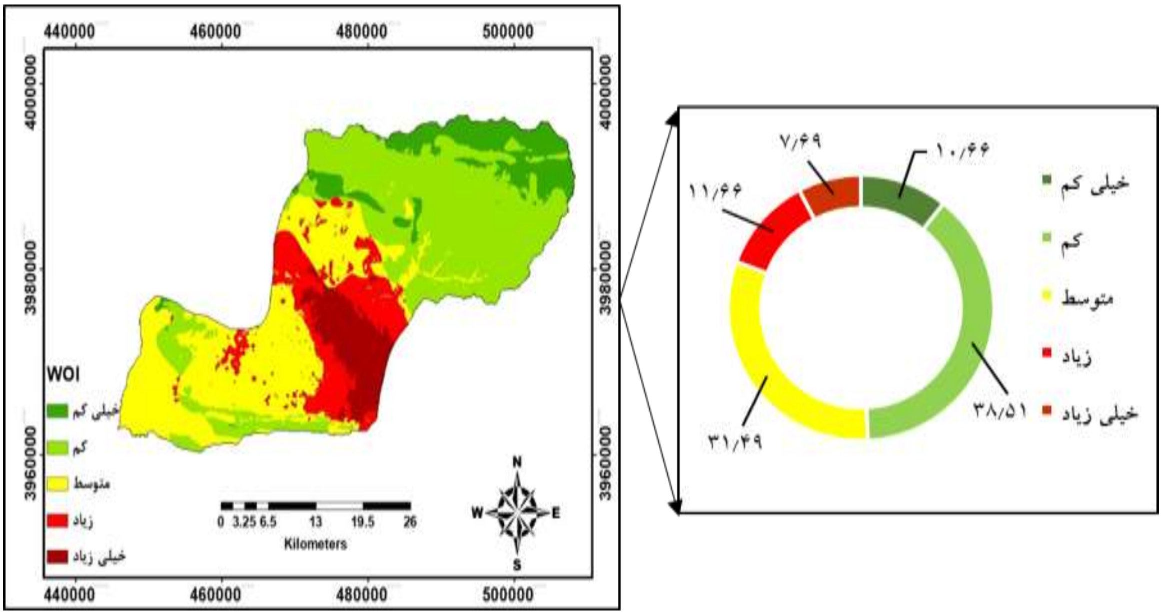
در ادامه، ۲۰ عدد پرسشنامه بین کارشناسان ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی توزیع و با استفاده از مدل BWM وزن معیارها و زیرمعیارها محاسبه گردید. برای این کار، در ابتدا بر اساس نظر کارشناسان مهم‌ترین و کم اهمیت‌ترین زیرمعیار مشخص شد؛ در ادامه، پرسشنامه‌ها در دو بخش (بخش اول مقایسه بهترین زیرمعیار با سایر زیرمعیارها و بخش دوم مقایسه سایر زیرمعیارها با بدترین زیرمعیار) بین کارشناسان توزیع شدند تا بر اساس اصطلاحات زبانی آن

زیرمعیارها را با یکدیگر مقایسه کنند. در ادامه، پس از جمع‌آوری اطلاعات، اعـداد مربوطـه وارد نرم‌افـزار LINGO شد تا بر اساس آن وزن زیرمعیارها محاسبه گردد. سپس با میانگین‌گیری از تمام خبرگان، ضریب اهمیـت و یـا وزن هر یک از معیارها مطابق جدول (۳) به‌دست آمد. از آنجایی که ξ^* بیانگر میزان سازگاری یک مقایسه می‌باشـد، ایـن شاخص برای همه کارشناسان در این پژوهش نزدیک به صفر است که می‌توان نتیجـه گرفـت نتـایج به‌دسـت آمـده سازگاری بسیار خوب داشته است و قابل قبول بوده است.

جدول ۳- میزان اهمیت معیارهای مؤثر بر فرونشست دشت هشتگرد

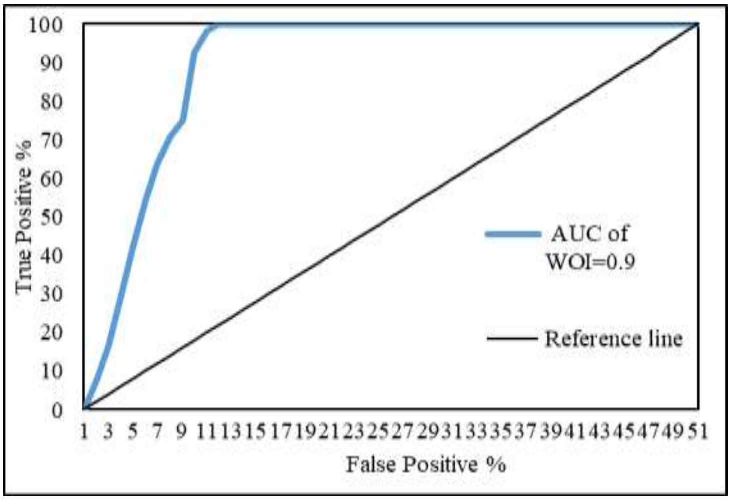
بعد	معیار	زیرمعیار	وزن	وزن نهایی	رتبه
فیزیکی – شیمیایی ۰/۸۵۸	هیدرولوژی ۰/٦۸	افت سطح آب زیرزمینی	۰/۱۳٦	۰/۰۷۹	۳
		برداشت آب زیرزمینی	۰/۳۷۵	۰/۲۱۹	۱
		ضخامت آبخوان	۰/۰۸۲	۰/۰٤۸	۸
		ضخامت آبرفت	۰/۱۰۲	۰/۰٦	۷
		تغذیه آبخوان	۰/۰۵۸	۰/۰۳٤	۱۰
		تراکم چاه‌ها	۰/۰٦۸	۰/۰٤	۹
		تراکم زهکشی	۰/۰٤۳	۰/۰۲۵	۱۳
		عمق آب زیرزمینی	۰/۱۳٦	۰/۰۷۸	٤
	زمین‌شناسی ۰/۲۲	نوع سازند زمین‌شناسی	۰/۸۳۳	۰/۱۵۷	۲
		عمق سنگ‌بستر	۰/۱٦۷	۰/۰۳۲	۱۱
	اقلیم ۰/۱	میزان بارش سالانه	۰/۷٤۳	۰/۰٦٤	٦
		متوسط دمای سالانه	۰/۱	۰/۰۰۹	۱۷
		نوع اقلیم سرزمین	۰/۱۵۷	۰/۰۱۳	۱۵
اجتماعی – اقتصادی ۰/۱٤۲	کاربری اراضی ۰/۸	کاربری کشاورزی	۰/۲۳۳	۰/۰۲٦	۱۲
		کاربری شهری	۰/۰۸٤	۰/۰۱۰	۱٦
		کاربری صنعتی	۰/٦۸۳	۰/۰۷۷	۵
	حرایم ۰/۲	فاصله از رودخانه‌ها	۰/۲۲۵	۰/۰۰٦	۱۸
		فاصله از جاده‌ها	۰/۱۲۵	۰/۰۰٤	۱۹
		فاصله از گسل‌ها	۰/٦۵	۰/۰۱۸	۱٤

بر اساس روش BWM و با توجه به نظر کارشناسان، عوامل برداشـت از آب زیرزمینـی (۰/۲۱۹)، نـوع سـازند زمین‌شناسی (۰/۱۵۷)، افت سطح آب زیرزمینی (۰/۰۷۹) و عمق آب زیرزمینی (۰/۰۷۸) اهمیت بیشتری بر پتانسـیل خطر وقوع فرونشست در دشت هشتگرد دارند. در این مرحله، لایه‌ها با استفاده از شاخص همپوشانی وزیـن جهـت تهیه نقشه پهنه‌بندی فرونشست ادغام شدند که در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- پهنه‌بندی پتانسیل فرونشست بر اساس روش شاخص هم‌پوشانی وزنی در دشت هشتگرد

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، ۱۰/٦٦ درصد از مساحت منطقـه موردمطالعـه بـه طبقـه خیلـی کم‌خطـر، ۳۸/۵۱ درصد به طبقه خطر کم، ۳۱/٤۹ درصد به طبقه خطر متوسط، ۱۱/٦٦ درصد به طبقه پرخطر و در نهایت ۷/٦۹ درصد به طبقه خیلی پرخطر اختصاص یافته است. بر طبق نقشه خروجی، نیمه مرکزی دشـت هشـتگرد حساسـیت بیشتری برای فرونشست دارد و امکان وقوع این مخاطره در این بخش حوضه بسیار زیاد می‌باشـد. هم‌پوشـانی ایـن نقشه با نقشه معیارها نشان داد که بیشتر مناطق آسیب‌پذیر به فرونشست در نزدیکـی گسـل‌ها، منـاطقی بـا بیشـترین برداشت آب زیرزمینی، اراضی کشاورزی و در مخروط افکنه‌ها و تراس‌های آبرفتی مرتفع قدیمی اتفاق افتاده اسـت. درنهایت، به‌منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل برای پهنه‌بندی خطر فرونشست، از منحنی ROC و سطح زیر منحنی AUC استفاده شد. بدین منظور نقاط برداشت شده و مقادیر عددی متناظر با آن‌ها در نقشه نهایی پتانسیل فرونشست وارد محیط نرم‌افزار SPSS شد و منحنی ROC محاسبه شد. سطح زیر منحنی برابر با ۰/۹ درصد است که عملکرد بسیار خوب مدل و کارایی آن برای پهنه‌بندی فرونشست را نشان می‌دهد.



شکل ۹- نمودار ارزیابی عملکرد مدل بر اساس منحنی‌های ROC

٤- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای ارزیابی پتانسیل وقوع فرونشست در دشت هشتگرد از ۱۹ زیرمعیار تأثیرگذار در وقوع فرونشست، شامل میزان افت آب زیرزمینی، برداشت آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، ضخامت آبرفت، تغذیه آبخوان، تراکم چاه‌ها، تراکم زهکشی، عمق سطح آب زیرزمینی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق سنگ‌بستر، میزان بارش سالانه، متوسط دمای سالانه، نوع اقلیم سرزمین، کاربری کشاورزی، کاربری شهری، کاربری صنعتی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و فاصله از گسل استفاده و با مدل BWM وزن‌دهی شدند. بر اساس مدل BWM و با توجه به نظر کارشناسان، عوامل برداشت از آب زیرزمینی (۰/۲۱۹)، نوع سازند زمین‌شناسی (۰/۱۵۷)، افت سطح آب زیرزمینی (۰/۰۷۹) و عمق آب زیرزمینی (۰/۰۷۸) اهمیت بیشتری بر پتانسیل رخداد فرونشست در دشت هشتگرد دارند.

درنهایت، با تلفیق وزن معیارها و نقشه‌های استاندارد شده معیارها، نقشه نهایی پتانسیل مناطق مستعد وقوع فرونشست در دشت هشتگرد به‌دست آمد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مناطق مرکزی دشت هشتگرد ریسک بالایی نسبت به رخداد فرونشست زمین دارند. همچنین، بررسی مساحت هر یک از کلاس‌ها نشان داد که ۱۰/٦٦ درصد از مساحت منطقه موردمطالعه به طبقه خیلی کم‌خطر، ۳۸/۵۱ درصد به طبقه خطر کم، ۳۱/٤۹ درصد به طبقه خطر متوسط، ۱۱/٦٦ درصد به طبقه پرخطر و درنهایت ۷/٦۹ درصد به طبقه خیلی پرخطر اختصاص یافته است. بنابراین، بر اساس نتایج نقشه حساسیت تهیه شده فرونشست‌ها و نیز با توجه به تعیین میزان اهمیت عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، نتایج این پژوهش می‌تواند به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران در پیشگیری از این مخاطره محیطی و برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب و جلوگیری از برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی کمک شایانی نماید.

همچنین، نگارندگان بر این باورند که در تحقیقات آینده، استفاده از روش‌های دیگر همچون ماشین یادگیری و مقایسه نتایج آن با نتایج این پژوهش می‌تواند نقش مؤثری در افزایش دقت و کارایی نتایج داشته باشد. همچنین پایش و بررسی جامع وضعیت فرونشست منطقه با بهره‌گیری از آنالیز سری‌های زمانی تصاویر راداری می‌تواند کمک شایانی در طرح‌های آمایش سرزمین و طرح‌های آبخیزداری داشته باشد.

کتابنامه

ابراهیمی، عطرین؛ قاسمی، افشان؛ گنجائیان، حمید؛ ۱۳۹۹. پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *جغرافیا و روابط انسانی*. دوره ۲. شماره ٤. صص ٤۱-۲۹.
https://www.gahr.ir/article_105079.html

پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب؛ ۱۳۹۲. پیش‌بینی فرونشست ناشی از بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی ترکیبی و تکنیک تداخل‌سنجی در تصاویر ماهواره‌ای راداری. مؤسسه تحقیقات آب.
https://www.wri.ac.ir/research-institute-of-water-resources-studies-and-research/

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور؛ ۱۳۸٦. گزارش آب زمین‌شناسی دشت هشتگرد- طرح فرونشست زمین در محدوده استان تهران (جلد دوم). شرکت توسعه علوم زمین.https://www.ngdir.ir/down/443

شریفی‌کیا، محمد؛ افضلی، عباسعلی؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹٤. استخراج و ارزیابی اثرات پدیده‌های ژئومورفولوژیک ناشی از فرونشست در دشت دامغان. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*. سال چهارم. شماره ۲. صص ۷٤-٦۰.
http://www.geomorphologyjournal.ir/article_77991.html

شریفی‌کیا، محمد؛ مال امیری، نعمت؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹۲. سنجش آسیب‌پذیری سکونت‌گاه‌ها و تأسیسات از مخاطره مورفولوژیکی فرونشست در بخشی از جنوب شهر تهران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۲. شماره ۱. صص ۱۰٦-۹۱. https://doi.org/10.22067/geo.v2i1.21020

شفیعی، نجمه؛ مختاری، لیلا گلی؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان؛ ۱۳۹۸. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. سال هشتم. شماره ٤. صص ۱۱۱-۹۳. https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.106424

عابدینی، موسی؛ آقایاری، لیلا؛ اصغری، صیاد؛ ۱٤۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی خطرفرونشست با استفاده از الگوریتم تطبیقی MABAC و ANP (مطالعه موردی: دشت اردبیل). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۱۰. شماره ۲. صص ۱٥٥-۱۳٦. https://doi.org/10.22034/GMPJ.2021.215108.1214

محرمی، میثم؛ ارگانی، میثم؛ ۱۳۹۹. پتانسیل‌یابی مناطق مستعد زمین‌لغزش با استفاده از مدل FBWM (مطالعهٔ موردی: شهر تبریز). آمایش سرزمین. دوره ۱۲. شماره ۲. صص ٥۹۳-٥۷۱.
https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.295295.670058

مهرابی، علی؛ غضنفرپور، حسین؛ ۱۳۹۸. پایش روند تغییرات ارتفاعی سطح زمین در شهر کرمان و تعیین مناطق پرخطر با استفاده از تصاویر راداری ASAR و SENTINEL 1. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۸. شماره ۲. صص ۱۸۲-۱٦۷. https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.77132

ندیری، عبدالله؛ طاهری، زینب؛ برزگری، قدرت؛ دیده‌بان، خلیل؛ ۱۳۹۷. ارائه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک. *تحقیقات منابع آب ایران*. دوره ۱٤. شماره ۲. صص ۱۹٤-۱۸۲ http://www.iwrr.ir/article_53792.html

نگهبان، سعید؛ پی سوزی، تینا؛ گنجائیان، حمید؛ نوروزی، میلاد؛ ۱٤۰۰. شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش و جابجایی عمودی با استفاده از تصاویر راداری (مطالعه موردی: محدوده شهری و حاشیه شهری لواسان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. دوره ۱۰. شماره ۳. صص ۱۸-۱. https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.71728.1094

Abidin H.Z, Andreas H, Gumilar I, Sidiq T.P, Gamal M., 2015. Environmental impacts of land subsidence in urban areas of Indonesia. In FIG Working Week (pp. 1-12). Sofia, Bulgaria: TS 3-Positioning and Measurement. https://www.oicrf.org/-/fig-working-week-2015-from-the-wisdom-of-the-ages-to-the-challenges-of-modern-world

Arabameri A, Lee, S, Rezaie F, Chandra Pal S, Asadi Nalivan O, Saha A, Chowdhuri I, Moayedi H., 2021. Performance evaluation of GIS-based novel ensemble approaches for land subsidence susceptibility mapping. Frontiers in Earth Science, 9, 307. https:// doi.org/ 10.3389/ feart.2021.663678

Chen, B., Gong, H., Lei, K., Li, J., Zhou, C., Gao, & M., et al., 2019. Land subsidence lagging quantification in the main exploration aquifer layers in Beijing plain, China. Applied Earth Observation and Geoinformation, 75, 54-67. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.003

Conforti M, Muto F, Rago V, Critelli S., 2014. Landslide inventory map of north-eastern Calabria (South Italy), Maps, 10(1), 90-102. https:// doi.org/ 10.1080/ 17445647. 2013. 852142

Desir G, Gutiérrez F, Merino J, Carbonel D, Benito-Calvo A, Guerrero J, Fabregat I., 2018. Rapid subsidence in damaging sinkholes: measurement by high-precision leveling and the role of salt dissolution. Geomorphology, 503, 393-409. https:// doi.org/ 10.1016/ j. geomorph.2017.12.004

Faunt C.C, Sneed M, Traum J, Brandt J.T., 2016. Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. Hydrogeology, 24(3), 675–684. https:// doi.org/ 10.1007 /s10040-015-1339-x

Galloway D.L, Jones D.R, Ingebritsen S.E., 1999. Land subsidence in the United States (Vol. 1182). US Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/pdf/circ1182_intro.pdf

Galloway, D. L., 2013. Subsidence induced by underground extraction. Encyclopedia of Natural Hazards, Springer, 979-985. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_336

Ghorbanzadeh O, Blaschke T, Aryal J, Gholaminia K., 2020. A new GIS-based technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system for land subsidence susceptibility mapping. Spatial Science, 65(3), 401-418. https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1505564

Hakim W.L, Achmad A.R, Lee C.W., 2020. Land subsidence susceptibility mapping in jakarta using functional and meta-ensemble machine learning algorithm based on time-series InSAR data. Remote Sensing, 12(21), 3627-3653. https://doi.org/10.3390/rs12213627

Hu B, Zhou J, Wang J, Chen Z, Wang D, Xu S., 2009. Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China, Environmental Earth Sciences. 59(2), 269-276. https://doi.org/10.1007/s12665-009-0024-6

Huang B, Shu L, Yang Y.S., 2012. Groundwater overexploitation causing land subsidence: hazard risk assessment using field observation and spatial modeling. Water Resources Management, 26(14), 4225-4239. https://doi.org/10.1007/s11269-012-0141-y

Jeanne P, Farr T.G, Rutqvist J, Vasco D.W., 2019. Role of agricultural activity on land subsidence in the San Joaquin Valley, California. Hydrology, 569, 462-469. https:// doi.org/ 10.1016/j.jhydrol.2018.11.077

Modoni G, Darini G, Spacagna R.L, Saroli M, Russo G, Croce P., 2013. Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. Engineering Geology, 167, 59-71. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.014

Mohammadi M, Pourghasemi H.R, Amiri M., 2019. Assessment of land subsidence susceptibility in Semnan plain (Iran): A comparison of support vector machine and weights of evidence data mining algorithms. Natural Hazards, 99(2), 951-971. https:// doi.org/ 10.1007/ s11069-019-03785-z

Mokhtari M, Abedian S., 2019. Spatial prediction of landslide susceptibility in Taleghan basin, Iran. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 33(7), 1297-1325. https://doi.org/10.1007/s00477-019-01696-w

Nadiri A.A, Taheri Z, Khatibi R, Barzegari G, Dideban K., 2018. Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT. Science of the Total Environment, 628, 1043-1057. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.031

Navarro-Hernández M.I, Tomás R, Lopez-Sanchez J.M, Cárdenas-Tristán A, Mallorquí J.J., 2020. Spatial Analysis of Land Subsidence in the San Luis Potosi Valley Induced by Aquifer Overexploitation Using the Coherent Pixels Technique (CPT) and Sentinel-1 InSAR Observation. Remote Sensing, 12(22), 3822. https://doi.org/10.3390/rs12223822

Pacheco J, Arzate J, Rojas E, Arroyo M, Yutsis V, Ochoa G., 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Quere ´taro valley, Mexico. Engineering Geology, 84(3), 143-160. https:// doi.org/ 10.1016/ j.enggeo.2005.12.003

Piscopo G., 2001. Groundwater vulnerability map explanatory Notes-Castlereagh Catchment. NSW Department of Land and Water Conservation, Australia. http:// www. water. nsw. gov.au/ __data/ assets/pdf_file/0008/549377/

Pradhan B, Abokharima M.H, Jebur M.N, Tehrany M.S., 2014. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. Natural Hazards, 73(2), 1019-1042. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1128-1 quality_ groundwater_ castlereagh_map_notes.pdf

Rahmati O, Falah F, Naghibi S.A, Biggs T, Soltani M, Deo R.C, Artemi C, Mohammadi F, Bui D.T., 2019. Land subsidence modeling using tree-based machine learning algorithms. Science of The Total Environment, 672, 239–252. https:// doi.org/ 10.1016/ j.scitotenv .2019.03.496

Rahnema H, Mirassi S., 2016. Study of land subsidence around the city of Shiraz, Scientia Iranica. Scientia Iranica, 23(3), 882-895. https://doi.org/10.24200/sci.2016.2167

Ranjgar B, Razavi-Termeh S.V, Foroughnia F, Sadeghi-Niaraki A, Perissin D., 2021. Land subsidence susceptibility mapping using persistent scatterer SAR interferometry technique and optimized hybrid machine learning algorithms. Remote Sensing, 13(7), 1326. https://doi.org/10.3390/rs13071326

Rezaei J., 2016. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. Omega, 64, 126-130. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001

Sadeghfam S, Khatibi R, Dadashi S, Nadiri A.A., 2020. Transforming subsidence vulnerability indexing based on ALPRIFT into risk indexing using a new fuzzy-catastrophe scheme. Environmental Impact Assessment Review, 82, 106352. https:// doi.org/ 10.1016 /j.eiar.2019.106352

Shrestha P.K, Shakya N.M, Pandey V.P, Birkinshaw S.J, Shrestha S., 2017. Model-based estimation of land subsidence in Kathmandu Valley, Nepal. Geomatics Natural Hazards Risk, 8(2), 974–996. https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1289985

Sopata P, Stoch T, Wójcik A, Mrocheń D., 2020. Land Surface Subsidence Due to Mining-Induced Tremors in the Upper Silesian Coal Basin (Poland)-Case Study. Remote Sensing, 12(23), 3923. https://doi.org/10.3390/rs12233923

Tafreshi G.M, Nakhaei M, Lak R., 2019. Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. GeoJournal, 86(38), 1-21. https:// doi.org/ 10.1007/ s10708-019-10129-8

Tosi L, Teatini P, Strozzi T., 2013. Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. Scientific reports, 3(1), 1-9. https://doi.org/10.1038/srep02710

UNESCO., 2018. Proposal for the establishment of the land subsidence international initiative (LaSII), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris. https:// www.usgs.gov/media/files/proposal-creation-land-subsidence-international-initiative

Wang Y. Q, Wang Z. F, Cheng W. C., 2019. A review on land subsidence caused by groundwater withdrawal in Xi'an, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78(4), 2851-2863. https://doi.org/10.1007/s10064-018-1278-6

Zhang H, Yu J, Du C, Xia J, Wang X., 2019. Assessing risks from groundwater exploitation and utilization: Case study of the Shanghai megacity, China. Water, 11(9), 1775. https://doi.org/10.3390/w11091775

Zheng Y.Y, Chen Y.L, Lin H.R, Huang S.Y, Yeh T.C, Wen J.C., 2017. A Simple Model to Describe the Relationship among Rainfall, Groundwater and Land Subsidence under a Heterogeneous Aquifer. In AGU Fall Meeting Abstracts, (Vol. 2017, pp. H34A-08). https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFM.H34A..08Z/abstract

Zhou C, Gong H, Chen B, Gao M, Cao Q, Cao J, Duan L, Junjie J, Shi, M., 2020. Land subsidence response to different land use types and water resource utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China. Remote Sensing, 12(3), 457-479. https://doi.org/10.3390/rs12030457